

Pósfai Mihály

Mágneses ásványok képződése és növekedése baktériumokban

2005 – 2009

a K48607-as számú OTKA pályázat szakmai zárójelentése

1. Bevezetés.....	2
1.1 A kutatómunka célja.....	2
1.2 A munkaterv kutatási programja, eltérések indoklása.....	2
2. Eredmények.....	4
2.1 Magnetit magnetoszómák mágneses tulajdonságai.....	4
2.1.1 Magnetoszómák kristálytani orientációjának hatása a mágnességre	4
2.1.2 A magnetit Verwey-transzformációjának vizsgálata	5
2.1.3 Genetikailag módosított baktériumok által képzett magnetoszómák mágnessége	5
2.2 Vas-szulfid magnetoszómák mágneses tulajdonságai.....	6
2.3 A kristályképződés szabályozása a mágneses baktériumokban	7
2.3.1 Balatoni mágneses baktériumok.....	7
2.3.2 <i>Desulfovibrio magneticus</i> vizsgálata	8
2.3.3 A magnetotaxis minimum feltételei	8
2.3.4 Környezeti tényezők hatása a magnetit csírák képződésére és növekedésére	9
2.4 Magnetit nanokristályok szintézise	10
2.4.1 Kísérletek szervesetlen reagensekkel	10
2.4.2 Magnetit szintézis szerves adalékokkal	10
2.4.3 A maghemit szerkezete	12
2.4.4 Vas-oxidok azonosítása elektron-energiavesztési spektrometriával	14
2.4.5 A szintetikus vas-oxid nanokristályok potenciális alkalmazásai	14
2.5 Egyéb kutatási témák	15
2.5.1 Magnetit az emberi agyban	15
2.5.2 Szintetikus vas-oxid kristályok orvostudományi alkalmazása.....	15
2.5.3 Magnetit nanokristályok és agyagásványok aggregátumainak mágnessége	15
3. Publikációk és hivatkozások	16
4. A kutatáshoz kapcsolódó egyéb tevékenység, a kutatás visszhangja, egyéb eredmények.....	22
4.1 Nemzetközi konferencia szervezése.....	22
4.2 Előadások	22
4.3 TDK, szakdolgozat és PhD	23
4.4 Ismeretterjesztő tevékenység.....	23
5. A kutatáshoz felhasznált egyéb támogatás	24
6. Nyilatkozat	24

1. Bevezetés

1.1 A kutatómunka célja

A „biomineralizáció”, azaz az élő szervezetek által szabályozott kristályképződés az ásványtan egy rendkívül érdekes és intenzíven kutatott területe. A mágneses baktériumok vas-oxid vagy vas-szulfid nanokristályokat választanak ki a sejten belül. A kristályok a baktérium törzsre jellemző méretűek és termetűek, és általában meghatározott orientációban, láncokba rendeződve helyezkednek el a sejtben. Mivel a nanokristályok ferrimágnesesek, a baktérium a mágneses teret érzékeli és annak megfelelő irányú mozgást végez.

Kutatásunk célja a mágneses mikroorganizmusokban képződő ásványok tanulmányozása volt. Munkánk során modern transzmissziós elektronmikroszkópos módszerekkel vizsgáltuk a nanokristályok mágneses tulajdonságait meghatározó tényezők hatásait. Különbféle vad és tenyésztett, valamint genetikailag módosított baktérium törzsekben a kristályképződést meghatározó biológiai szabályozás mechanizmusait próbáltuk felderíteni. A természetes, biológiai rendszerben zajló kristályképződés részleteinek ismeretében célunk olyan szintézis eljárások kidolgozása volt, amelyekkel szabályozott méretű és alakú, ferrimágneses nanokristályok állíthatók elő.

1.2 A munkaterv kutatási programja, eltérések indoklása

A tervezett kutatás kísérleti és elméleti jellegű elemeket tartalmazott, melyek három, a gyakorlati tevékenység szempontjából jól elkülönülő egységre tagolhatók:

1. a mágneses baktériumokban lévő vas-oxid és vas-szulfid nanokristályok részletes vizsgálata analitikai transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) módszerekkel;
2. szintetikus vas-oxid (elsősorban magnetit) kristálycsírák képződésének és a kristályok növekedésének tanulmányozása;
3. a kristályképződés és –növekedés számítógépes modellezése, egyensúlyi kristályformák számítása.

Az 1. pont maradéktalanul teljesült, sőt, a munka ezen részét a tervhez képest jelentősen túlteljesítettük, akár az eredmények változatosságát, akár a publikációs tevékenységet nézzük. Nemcsak a mágneses baktériumok kristályképzéséről, hanem általában a vas-oxid és vas-szulfid nanokristályok mágnességéről is új ismereteket szereztünk. A munka ezen részében rendkívül hasznos volt, hogy négy hónapot a Cambridge-i Egyetem Anyagtudományi Tanszékén töltöttem vendégkutatóként, ami kitűnő alkalmat adott elektronmikroszkópos vizsgálatok, köztük elektronholográfiás (EH) mérések elvégzésére.

A vas-oxidok szintézisével kapcsolatos tervek is teljesültek (2. pont). Sokféle módon változatos méretű és alakú mágneses nanokristályokat állítottunk elő. A munkatervhez képest a kutatást kissé módosítottuk, mivel nem vezetett eredményre a magnetit nanokristályok kristályosodásának *in situ* vizsgálata atomi erőmikroszkóppal (AFM-mel). A hasonló vizsgálatokat eddig olyan ásványokon végezték, melyek kicsapódását-oldódását a magnetitnél könnyebb szabályozni (pl. kalcit, barit), és a kristálynövekedést nagyobb kristályok felületén nézték. A mi kísérleteinkben egyrészt a magnetit kristályok túl kicsinek és mechanikailag nehezen stabilizálhatónak bizonyultak az erőmikroszkópos pásztázáshoz, másrészt elképzelhető, hogy kísérleti módszerünk (mágneses rezgő módban végzett pásztázás) a

magnetit mágnessége miatt eleve nem célravezető. Az AFM módszer helyett a szintetizált nanokristályokat a már bevált transzmissziós elektronmikroszkópos módszerekkel vizsgáltuk.

A munkaterv 3. pontjában szereplő kutatást érdemben csak idén kezdtük meg. Ennek oka részben az, hogy nem találtunk a piacon megfelelő szoftvert (az eredetileg tervezett programot kipróbáltuk, nem volt alkalmas a célra). Másrészt az 1. és 2. kutatási feladat végzése során újabb és újabb résztémák nyíltak, melyek viszonylag rövid idő alatt is jó eredményt ígértek, ezért inkább ezekre fordítottuk a rendelkezésre álló időt. Az újabb résztémák között voltak „sajátok”, melyekben a kutatás a mi vezetésünkkel folyt, és olyanok, melyekben valamilyen részfeladatot – általában TEM vizsgálatokat – vállaltunk. A munkaterv 3. pontjában részletezett kutatást a pályázat befejeződésétől függetlenül a következő években folytatni fogjuk.

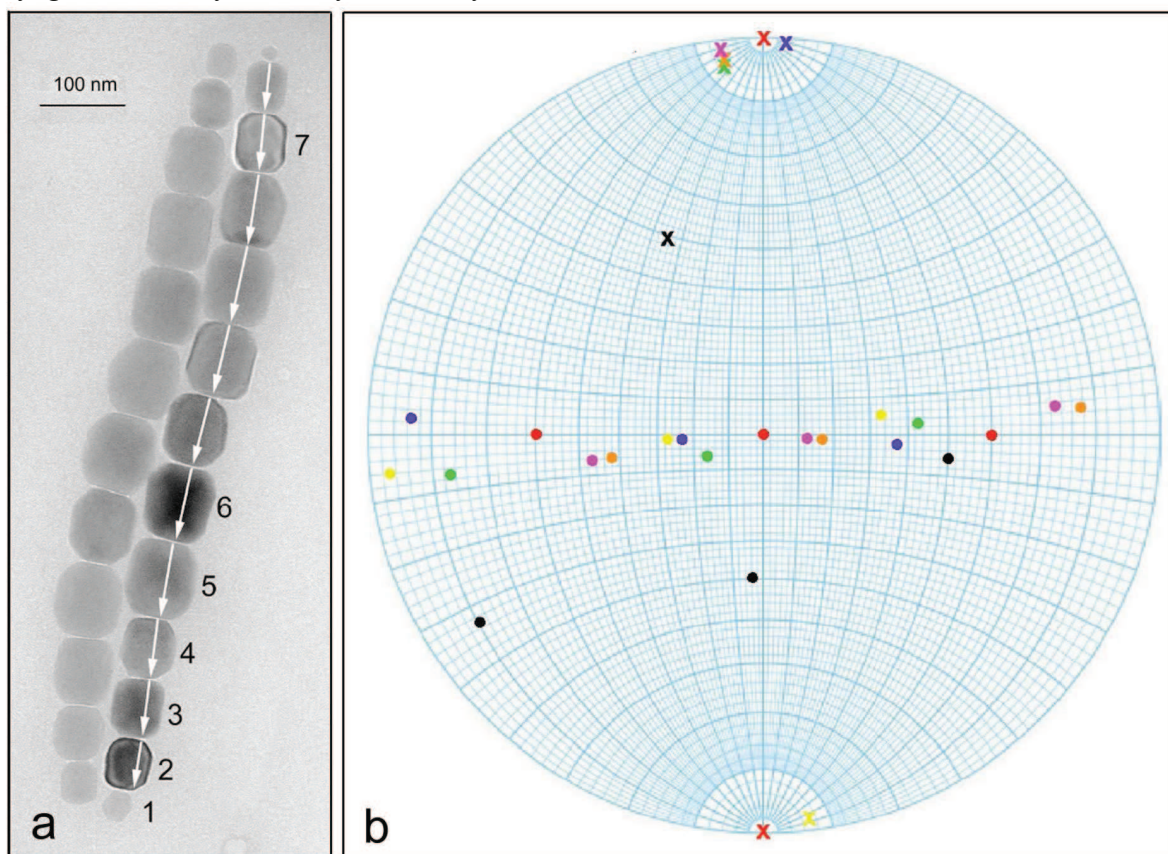
2. Eredmények

Eredményeink többségét referált folyóiratokban publikáltuk. Ezenkívül felkérésre több összefoglaló folyóiratcikk és könyvfejezet is készült a pályázat ideje alatt (ezek listája a 3. pontban található), ezért a publikált eredményeket az alábbiakban csak kivonatosan ismertetem, a résztémák szerinti csoportosításban. A kristálysztézissel kapcsolatos eredményeinket csak részben publikáltuk, ezért erről a témáról bővebben lesz szó.

2.1 Magnetit magnetoszómák mágneses tulajdonságai

2.1.1 Magnetoszómák kristálytani orientációjának hatása a mágnességre

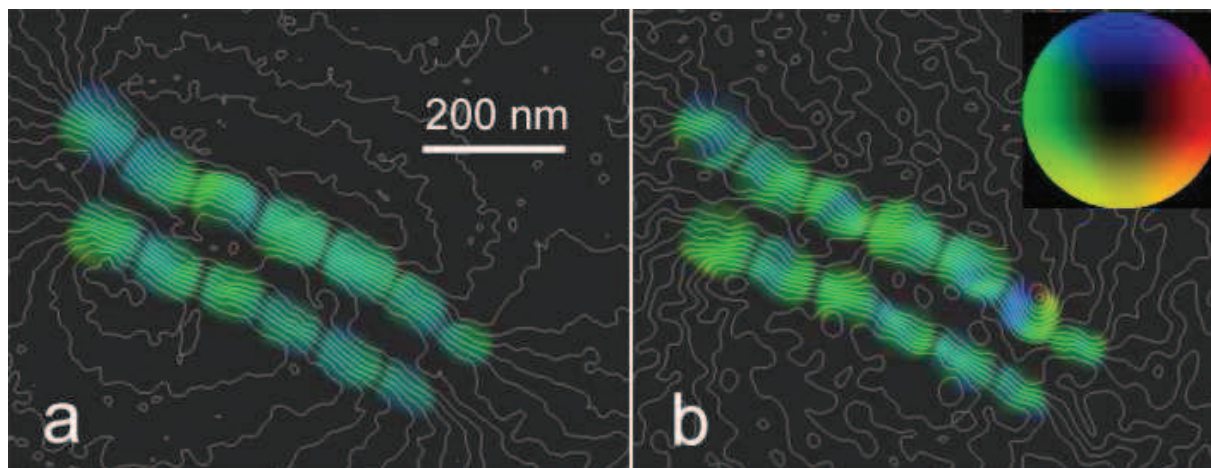
Elektronholográfia alkalmazásával vizsgáltuk a veszprémi Séd iszapjából gyűjtött, sejtenként két kettős magnetit láncot tartalmazó *coccus* baktériumokban a nanokristályok mágneses tulajdonságait. Nagyfelbontású transzmissziós elektronmikroszkópos (HRTEM) és elektrondiffrakciós felvételek alapján meghatároztuk a láncokat alkotó nanokristályok orientációját. Míg a kristályok $[111]$ iránya $1-3^\circ$ -on belül egymással megegyezik és párhuzamos a lánc tengelyével, addig e tengely körüli orientációjuk tetszőleges (1. ábra). A nanokristályok láncra tehát egy zsinórra fűzött gyöngysorhoz hasonlítható: míg a baktérium precízen szabályozza a kristályok méretét, alakját, valamint a könnyű mágnesezési irány, az $[111]$ láncsal párhuzamos orientációját, addig a mágneses momentum szempontjából lényegtelen kristálytani irányok szabályozatlanok maradnak.



1. ábra. (a) Kettős magnetit kristálylánc a veszprémi Séd iszapjából való mágneses baktérium sejtjében. A számozott kristályokról orientált elektrondiffrakciós és nagyfelbontású felvételeket készítettünk. (b) Az egyes kristályok láncsal párhuzamos $[111]$ (x jelek) és láncra merőleges $[110]$ (o jelek) irányainak ábrázolása sztereografikus vetületben. A különböző színek az egyes kristályokra vonatkoznak. A láncvégi, 1-es számún kívül (fekete szín) a kristályok $[111]$ tengelye legfeljebb 3° -ban tér el egymástól, míg az $[110]$ irányok tetszőlegesek.

2.1.2 A magnetit Verwey-transzformációjának vizsgálata

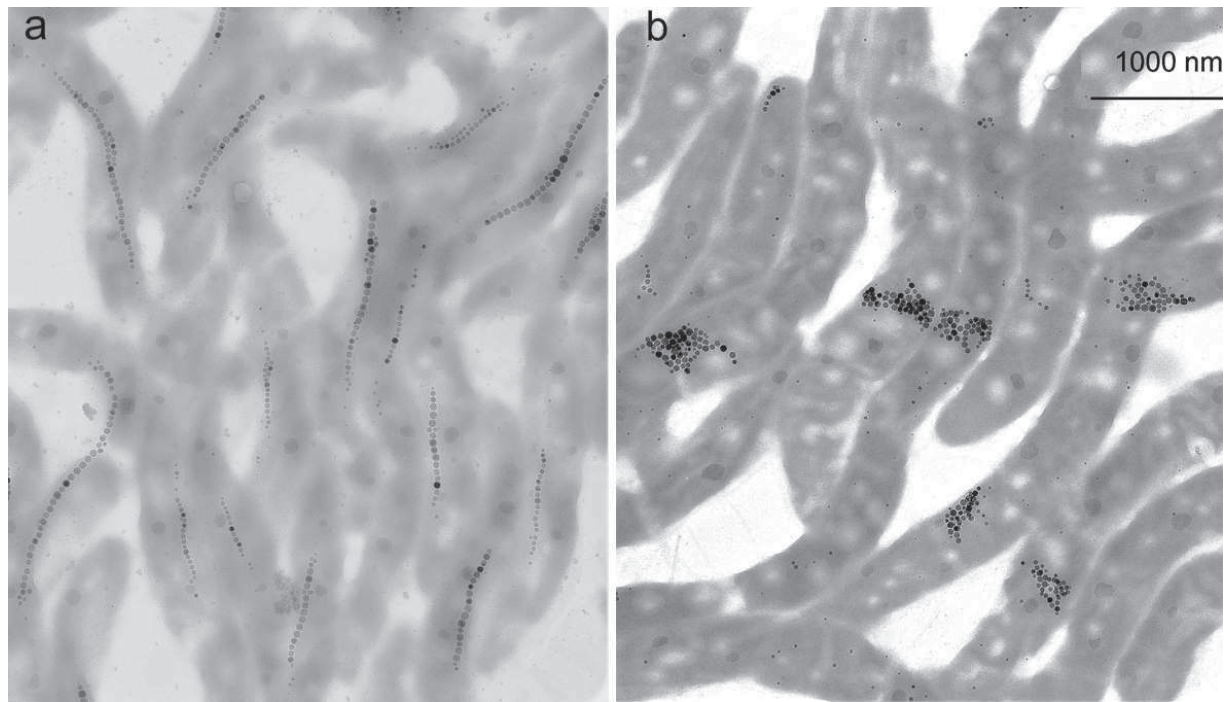
A magnetit alacsony hőmérsékleten végbemenő mágnese fázisátalakulásának (Verwey-transzformáció) mechanizmusát szobahőmérsékleten és 110 K-en készített elektronhologramok alapján vizsgáltuk a Sédből való baktériumokon. Megállapítottuk, hogy a láncokat alkotó egydomén nanokristályokban eredetileg azonos a mágnese indukció iránya, azonban a fázisátalakulás az indukcióvonalak hullámos, unduláló lefutását eredményezi (2. ábra). A magnetit kristályokban az eredeti, [111] irányú mágnesezettség az egyik [100] iránnyal vált párhuzamossá a fázisátalakulás hatására. Eredményeink alátámasztják a korábbi kísérleti megfigyeléseket és elméleti számításokat, azonban nanokristályokon először sikerült ezt az átalakulást megfigyelni és jellegzetességeit leírni.



2. ábra. A veszprémi Séd iszapjából származó mágnese baktérium sejtjében lévő kettős magnetit kristálylánc mágnese indukció térképe, amely elektronhologramok alapján készült. A színek a mágnese indukció irányát jelzik (a jobb felső sarkóban lévő színtérkép szerint), a fehér „szintvonalak” az indukció intenzitásának változására utalnak. (a) Szobahőmérsékleten készült felvétel; (b) 110 K-en készült felvétel. Az (a) ábrán a fehér vonalak a kristályok hosszanti élével párhuzamosak, egy irányba mutatnak, a kristályok mágnese egydomén jellegére utalva. A (b) ábrán a magnetit szerkezet átalakulása miatt a fehér vonalak hullámos lefutásúak.

2.1.3 Genetikailag módosított baktériumok által képzett magnetoszómák mágnessége

A *Magnetospirillum gryphyswaldense* vad típusában és ennek genetikailag módosított változataiban vizsgáltuk a magnetit kristályok tulajdonságait és a kristályláncok képződését. A mikro- és molekuláris biológiai munkát Dirk Schüller csoportja (korábban Max Planck Intézet, Bréma, jelenleg Ludwig Maximilians Egyetem, München) végezte. A mi feladatunk elektrondiffrakciós és nagyfelbontású elektronmikroszkópos felvételek készítése volt, valamint a Cambridge-i Egyetem kutatócsoportjával elektronholográfiás mérések végzése. A biológus kollégák olyan mutáns baktérium törzseket állítottak elő, melyekből egyes speciális magnetoszóma fehérjék hiányoztak. A sejtekben képződő magnetit jellemzésével kideríthető, hogy az adott fehérje milyen szerepet tölt be a magnetit képződésben. A MamJ mutáns (tehát egy olyan baktérium, amely a vad típustól annyiban különbözik, hogy nincs benne a MamJ fehérjét kódoló gén) pontosan ugyanolyan méretű és alakú kristályokat gyártott, mint a vad típus, azonban a kristályok nem alkottak láncokat, hanem rendezetlen csoportokba tömörültek a sejten belül (3. ábra). Ennek a mutánsnak EH vizsgálata kimutatta, hogy a csoportokba rendeződött magnetit nanokristályokban a mágnese indukció iránya változó, emiatt a sejt mágnese momentuma a vad típuséhoz képest jelentősen csökken.



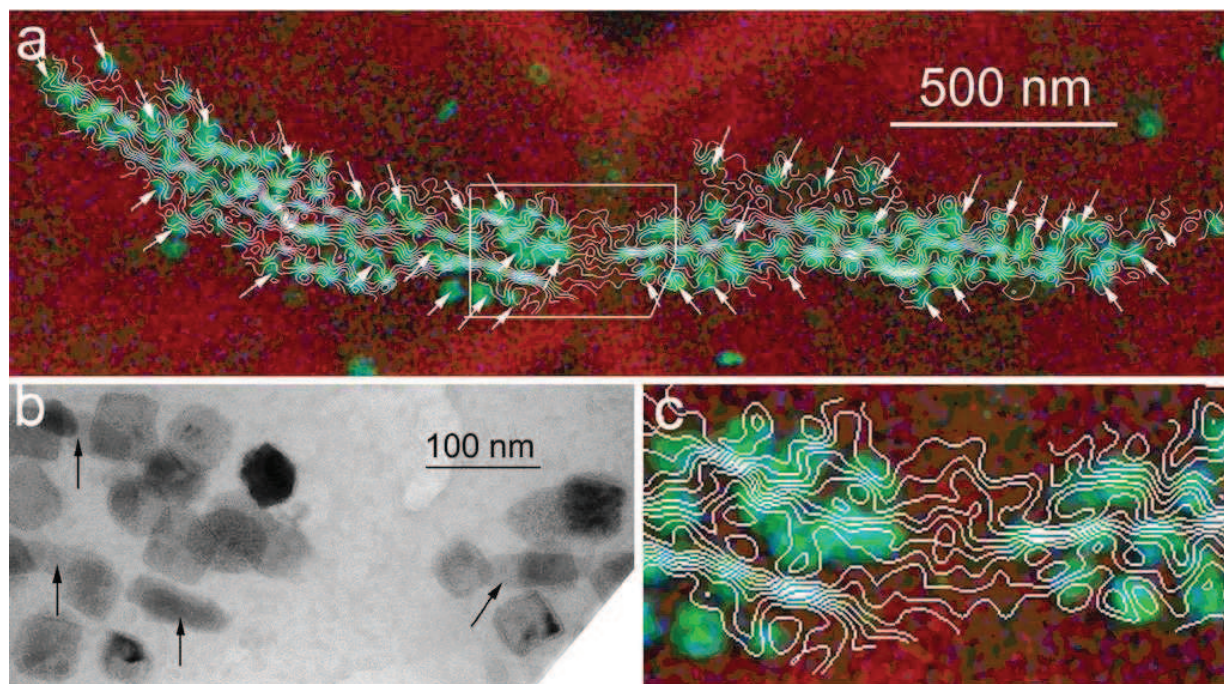
3. ábra. (a) A *Magnetospirillum gryphyswaldense* vad típusának sejtjei, egyes magnetit láncokkal. (b) Genetikailag módosított mutáns, melyből hiányzik a mamJ gén. A magnetit kristályok rendezetlen halmazokba csoportosulnak.

A fenti három alponthan taglalt vizsgálataink mind a mágneses kristályok növekedése és orientációja feletti biológiai szabályozással, mind a magnetit nanokristályok mágneses tulajdonságaival kapcsolatban új ismeretekhez vezettek. Vizsgálatainkkal a nanotartományban a mágnesség és a kristálméret, kristályalak és a kristályok magnetosztatikus kölcsönhatása közötti összefüggésekről kaptunk értékes eredményeket. Eredményeink egy részét a *Journal of Physics Conference Series* című folyóiratban közzétettük, a genetikailag módosított baktériumokkal kapcsolatos eredményeket egy már elkészült, de még nem leadott folyóiratcikk tartalmazza, melyet az *American Mineralogist* folyóiratba szánunk. Egyes eredményeinket az összefoglaló könyvfejezetek és az *Elements* folyóiratban megjelent cikk is tartalmazza.

2.2 Vas-szulfid magnetoszómák mágneses tulajdonságai

Elektronholográfiával (EH) vizsgáltuk a vas-szulfidot kiválasztó mágneses baktériumokban a magnetoszómák mágneses tulajdonságait. Az EH óriási előnye, hogy lehetővé teszi a kristályok mágneses paramétereinek kvantitatív, *in situ* mérését a nanométeres tartományban. Ezenkívül egy másik, új analitikai TEM módszert is alkalmaztunk, a Z-kontrasztos felvételsorozatokon alapuló elektrontomográfiát (ET). Két sejtben részletesen elemeztük a greigit (Fe_3S_4) kristályok kémiai összetételét (elektron-energiavesztései elemterképeken), szerkezetét és kristálytani orientációját (HRTEM és elektrondiffrakció révén), mágneses tulajdonságait (EH) és morfológiáját (ET). Mindezen vizsgálatok együttes alkalmazása nemcsak a szulfid magnetoszómák, hanem általában bármilyen nanokristály tekintetében újdonságnak számít. Az összetétel, orientáció és mágneses tulajdonságok összefüggései kiválóan elemezhetők a felvételek alapján. A szulfid magnetoszómák a magnetit-termelő baktériumokhoz képest jóval rendezetlenebbül helyezkednek el, ezért bennük a mágneses indukció iránya is változatos. Ennek ellenére a kvantitatív mérések szerint a sejtek a vízi környezetükben való mágneses navigáláshoz elegendő mágneses momentummal rendelkeznek. A többnyire izometrikus greigit kristályok között erősen megnyúlt magnetit kristályokat is azonosítottunk. Ezek a sejtek tehát egy magnetoszóma láncban belül kétféle ásványt választanak ki, mégpedig ezek morfológiája és

orientációja is eltérő (4. ábra). Eredményeinket két cikkben jelentettük meg, a *Physica B* és az *American Mineralogist* folyóiratokban, valamint a *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* szulfidokról szóló kötetében megjelent összefoglaló tanulmányban.

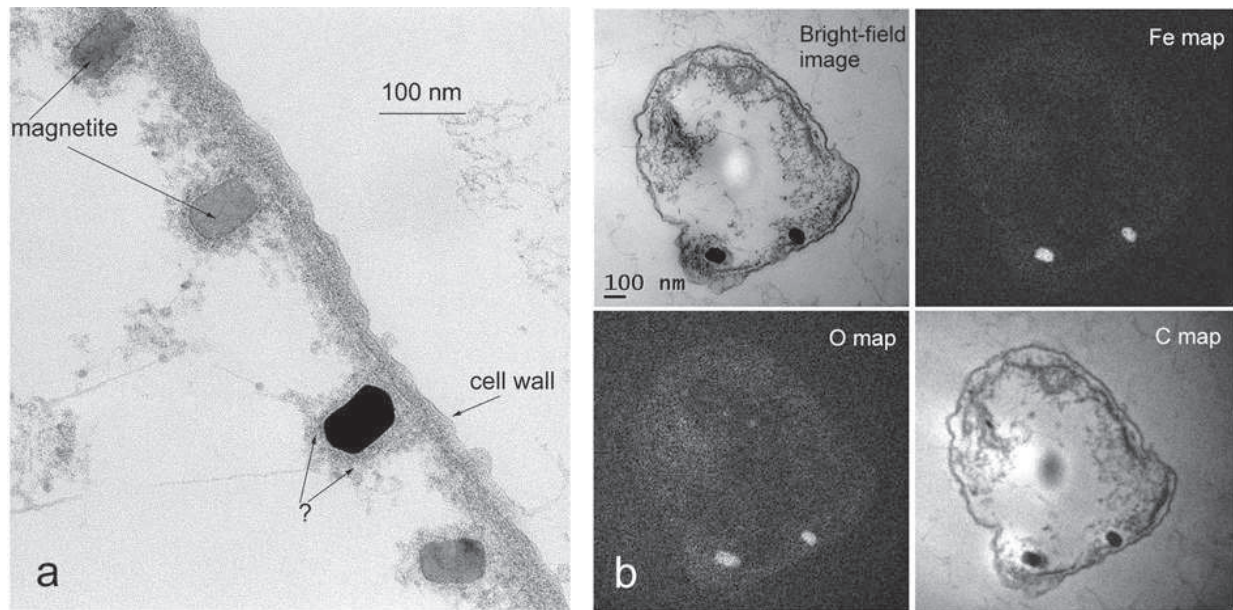


4. ábra. Vas-szulfid magnetoszómák egy Csendes-óceánból származó, osztódó mágneses baktérium sejtben. (a) Összetett kép, amely elektron-energiavesztési felvételekből és elektronhologramokból készült mágneses indukció térképből áll. A színek egyes elemek koncentrációjára utalnak: O (piros), S (zöld), Fe (kék). A kékeszöld foltok greigit magnetoszómák, amint ezt a nyíllal jelölt kristályok esetében elektrondiffrakciós felvételek is igazolják. (b) Világos látóterű felvétel az (a) ábrán bekeretezett részből. A nyíllal jelölt, hosszúkás kristályok magnetit magnetoszómák. (c) Az (a) ábrán bekeretezett rész nagyított képe. A fehér mágneses indukcióvonalak rendezetlen lefutásúak a greigit kristályok kevésbé szabályozott alakja és orientációja miatt.

2.3 A kristályképződés szabályozása a mágneses baktériumokban

2.3.1 Balatoni mágneses baktériumok

Vizsgáltuk a Balaton iszapjában élő mágneses baktériumok morfológiai típusaiban és mennyiségében bekövetkező évszakos változásokat. Négyféle sejtípust különítettünk el, a leggyakoribb morfológiai típusban a magnetit magnetoszómák részleges láncokat alkottak vagy szétszórtnak helyezkedtek el. E típus fixált és kontrasztosított sejtjeiből ultravékony metszeteket készítettünk. Ezeket többek között elektron-energiavesztési spektroszkópiával vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy a magnetit kristályok a belső sejtmembrántól közel egyenlő, ~20 nm-es távolságra helyezkednek el, és körülöttük erősen festődött anyag, valószínűleg a magnetoszóma membrán található (5.a ábra). A magnetit kristályokon kívül a sejtekben nem találtunk kimutatható vasdúsulást, tehát a korábbi feltételezésekkel szemben a magnetit nem valamilyen előfázisból, hanem közvetlenül az oldatból képződik (5.b ábra). Új eredménynek számít, hogy az egész sejt vizsgálatokban szétszórtnak tűnő magnetoszóma kristályok sejtbeli pozícióját meghatároztuk, valamint a magnetoszóma membrán és a sejtmembrán közötti kapcsolatot kimutattuk. Az eredmények egy részét a Hidrológiai Közönyben publikáltuk, az ultravékony metszetekről kapott eredményeket konferencia kivonatokban jelentettük meg.



5. ábra. Rendezetlen eloszlású magnetit kristályokat tartalmazó, a Balaton iszapjából gyűjtött sejtek fixált és festett metszeteinek képei. (a) A magnetit magnetoszómák a belső sejtmembránhoz kapcsolódnak. (b) Elektron-energiavesztési felvételek alapján készült elem térképek. Csak a két magnetit magnetoszóma tartalmaz vasat, a sejtben máshol nincs vasdúsulás.

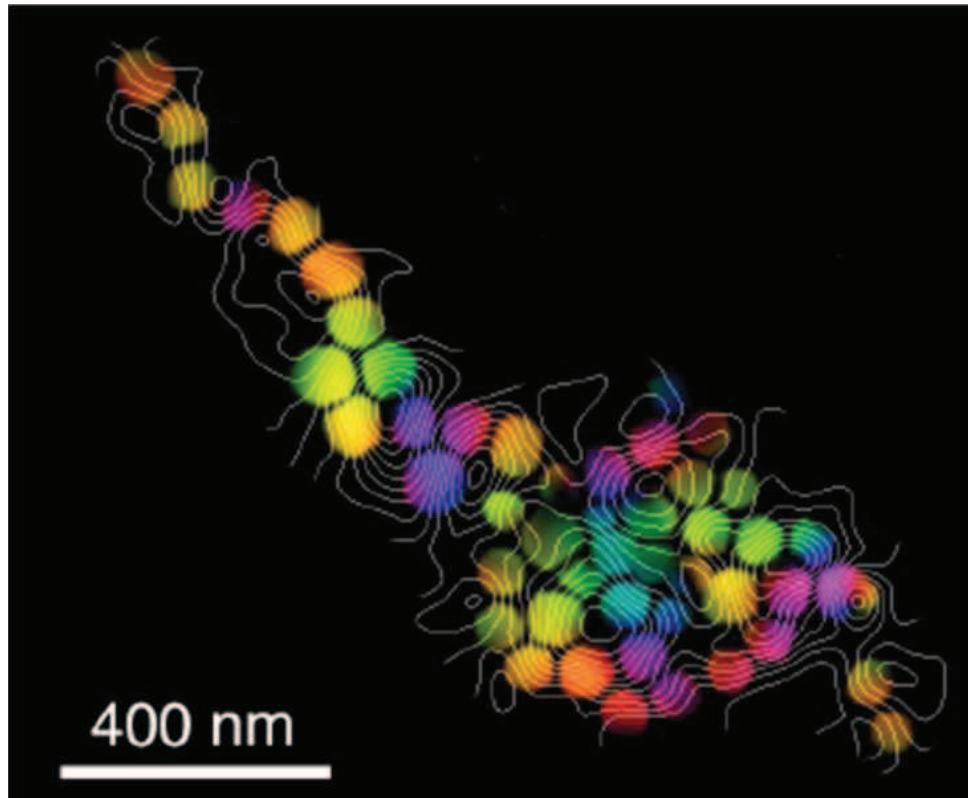
2.3.2 *Desulfovibrio magneticus* vizsgálata

A Brémai Max Planck Mikrobiológiai Intézet és a Minnesotai Egyetem Geomágnese Intézete kutatóival közösen vizsgáltuk a *Desulfovibrio magneticus* sejteiben lévő vas-oxid kristályokat. Az egyedi magnetoszómák vizsgálata kimutatta, hogy a kristályok megnyúlási iránya nem a könnyű mágnesezési irány ([111]), hanem az [100]. A magnetoszómák általában 40 nm-nél kisebbek, tehát többségük szuperparamágneses. Emiatt a baktérium csak rosszul orientálódik mágneses térben. A *Desulfovibrio magneticus* tehát a mágneses baktériumok között különlegesnek számít abban az értelemben, hogy a magnetit képződése a sejtekben „rosszul”, de legalábbis másként szabályozott, mint a többi ismert törzsben.

A magnetiten kívül egy másik, nem-mágneses vas-oxid, a hematit jelenlétét is kimutattuk. A néhány nm-es hematit kristályok nem a sejtben belül, hanem a sejt felületén helyezkednek el, és többszáz nm-es aggregátumokat alkotnak. Valószínűleg egy önszerveződő mechanizmus révén az egyedi nanokristályok az aggregátumban azonos orientációban vannak, tehát a kristályaggregátum egykristályra jellemző diffrakciót ad. Eredményeinket az *Earth and Planetary Science Letters* folyóiratban közzétettük, 2006-ban.

2.3.3 *A magnetotaxis minimum feltételei*

A mágneses baktériumok különleges képessége a magnetotaxis, azaz a mágneses tér irányának megfelelő mozgás. A *Magnetospirillum gryphyswaldense* eredeti típusában és ennek genetikailag módosított változataiban (lásd a 2.1.3 pontot) EH felvételek alapján mértük a sejtek mágneses momentumát, és számítottuk, milyen feltételek mellett tud a sejt a Föld mágneses terével párhuzamosan irányulni. A MamJ mutáns sejteiben a kristályok a MamJ fehérje hiánya miatt nem tudnak láncokba rendeződni. EH méréseink kimutatták, hogy a lánc helyett halmazokban lévő kristályok összegzett mágneses momentuma nem elegendő a magnetotaxisához (6. ábra). Ebben a témában jelenleg egy folyóiratcikk van közvetlen benyújtás előtti állapotban (az *American Mineralogist* folyóiratba szánjuk), de a munkából részleteket felhasználtunk a már megjelent összefoglaló tanulmányokban (két könyvfejezetben és az *Elements* folyóiratban 2009-ben megjelent cikkben).



6. ábra. Elektronhologramok alapján készült mágneses indukció térkép a *Magnetospirillum gryphiswaldense* MamJ mutánsáról. A halmazba tömörült magnetit kristályok a képen sokféle színben jelennek meg, utalva az egyes kristályok eltérő irányú mágneses momentumaira. Az egész halmaz nettó mágneses momentuma nullához közeli.

2.3.4 Környezeti tényezők hatása a magnetit csírák képződésére és növekedésére

Közreműködtünk a magnetit kristályok nukleációjának és növekedésének vizsgálatában, melyet a *Magnetospirillum gryphyswaldense* laboratóriumi tenyészetén végeztünk. A mikrobiológus együttműködők vasmentes tenyészetet állítottak elő, amelyben a sejtek nem tartalmaztak mágneses kristályokat. A vas hozzáadásával tanulmányozható volt a kristályok nukleációja, növekedése, méreteloszlásuk és alakjuk változása. A vASFelvétel sebessége – a folyamatosan vasgazdag környezetben lévő, referencia tenyészetéhez képest – befolyásolta mind a méreteloszlást, mind a kristálmorfológiát. Eredményeinkből cikk készült (*American Mineralogist*, 2008).

A 2.1, 2.2 és 2.3 pontban felsorolt altémákban kapott eredményeinkből felhasználtunk részleteket két összefoglaló könyvfejezetben (*Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria*, Springer; és *Handbook of Biomineralization*, Wiley-VCH), valamint egy cikkben az *Elements* folyóirat mágnességről szóló számában.

2.4 Magnetit nanokristályok szintézise

Szabályozott méretű és alakú magnetit nanokristályok laboratóriumi szintézisével foglalkoztunk. Az egész program végső célja a kristálynukleáció és –növekedés mágneses baktériumokban megvalósuló szigorú szabályozásának laboratóriumi reprodukálása. Ez a „biomimetikus kristálysintézis”, amelynek első lépéseit sikerült megtennünk a pályázat segítségével.

2.4.1 Kísérletek szervesen reagensekkel

Vas-ionokat tartalmazó oldatokból csapadékképzési reakciókkal állítottunk elő magnetit nanokristályokat. Vizsgáltuk, hogy a különböző reagensek, ezek koncentrációja, valamint a hőmérséklet, az érlelési idő, a levegő vagy nitrogén atmoszféra és egyes szervesen adalékanyagok milyen változásokat okoznak a kristálméretben és -alakban. Általánosítható eredményeink:

- Míg egyes kísérleti körülmények tiszta magnetit képződéséhez vezettek, több esetben goethit, lepidokrokit vagy maghemit is képződött. Az érlelési idő növelésével az alkotó fázisok arányai is változhatnak.
- A méret a 11-120 nm-es tartományban elég jól szabályozható a különféle reagensek (FeCl_2 , $\text{FeCl}_2 + \text{FeCl}_3$ vagy FeSO_4) alkalmazásával, de a méretek normál vagy lognormál eloszlást mutatnak, tehát a baktériumokra jellemző szűk méreteloszlást pusztán szervesen reagensekkel nem sikerült megvalósítani.
- Az ionerősség növelése, a pH vagy a hőmérséklet csökkentése a kristályok növekedését eredményezte. Bár az egyes tényezők hatásmechanizmusát nem ismerjük, a méretek a kristálycsíra-képződés és a kristályok növekedésének egyensúlyától függenek, és e két folyamat viszonyáról a méreteloszlások részletes elemzése alapján kaphatunk információt.
- A szintézisek többféle kristálmorfológiát eredményeztek, amelyeket a „szabálytalan”, „lekerekített” és „oktaéderes” kategóriákba soroltunk (7.a, b, c, d ábra).
- A kristálmorfológia bizonyos határok között szintén szabályozható. A hőmérséklet-csökkenés szabálytalan helyett lekerekített, az érlelési idő növelése szabálytalan helyett oktaéderes, míg foszfát hozzáadása az oktaéderes kristályok helyett szabálytalan alakú kristályok képződését eredményezte.
- A kristálmorfológia összefügg a mérettel: a kristálycsírák szabálytalan alakja a sokféle kristálylap megjelenésének köszönhető. A kristályok növekedése során a nagy felületi energiájú lapok eltűnnek, a ~50 nm-es kristályok habitusa már közelíti az egyensúlyi, oktaéderes morfológiát.

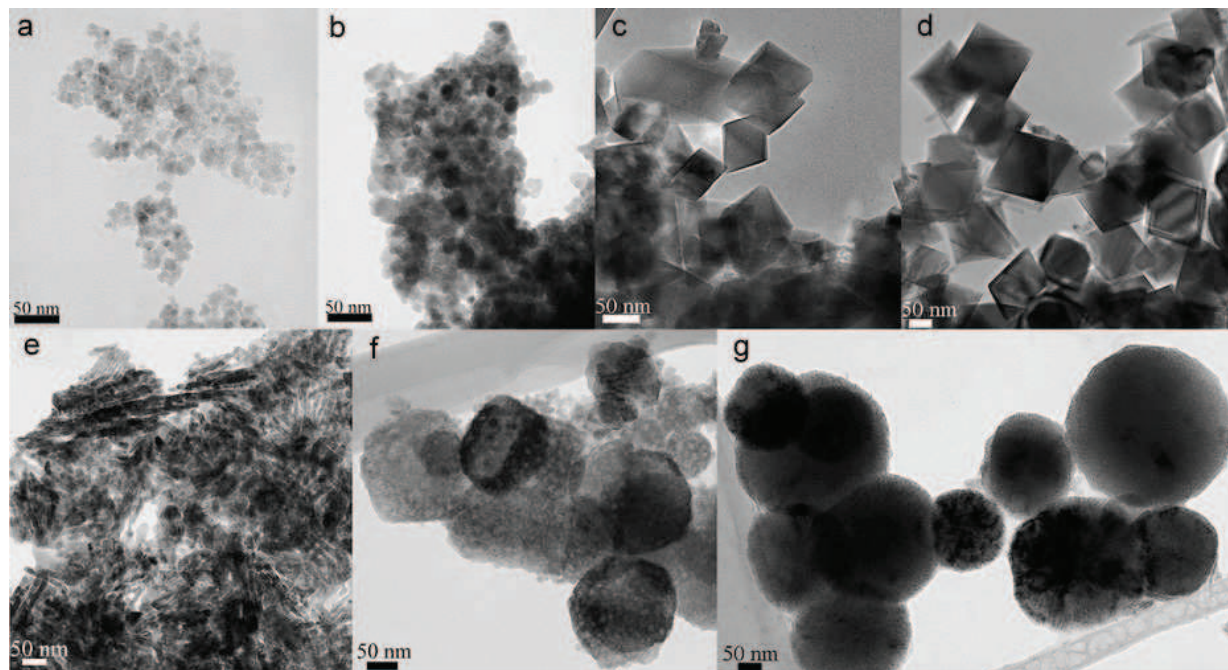
A szervesen reagensekkel végzett kísérletek eredményei 2009-ben a *European Journal of Mineralogy* folyóiratban jelentek meg.

2.4.2 Magnetit szintézis szerves adalékokkal

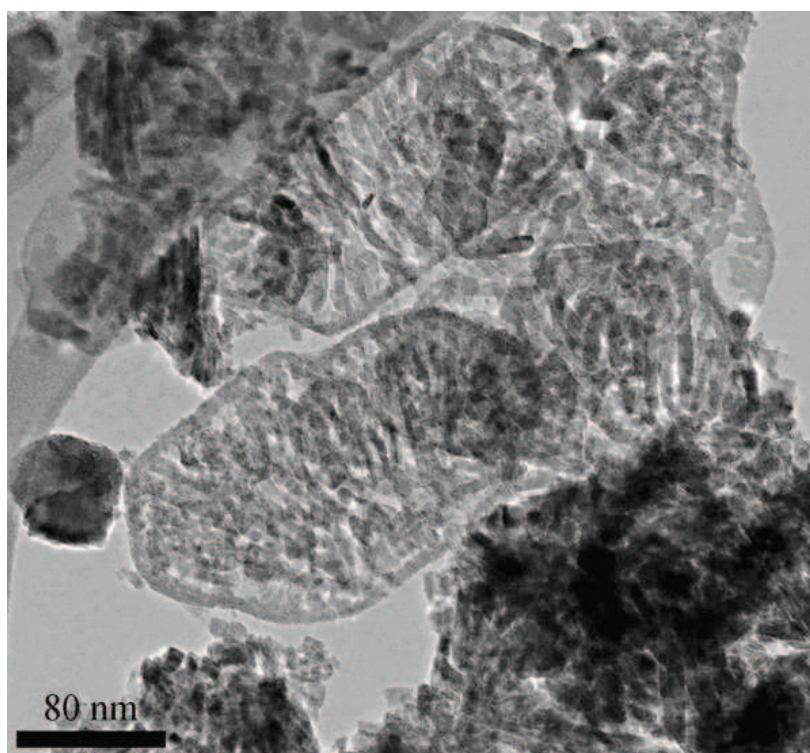
A szakirodalomban számos példa akad arra, hogy szerves adalékanyagokkal a szervesen kristályok morfológiája jelentős mértékben változtatható, nem-egyensúlyi kristálmorfológiák hozhatók létre. Ezért szerves adalékokat használva többféle módon kíséreltük meg a magnetit nanokristályok alakjának módosítását.

A nanokristályok nukleációját szintetikus bakteriális filamentumok hozzáadásával próbáltuk szabályozni. (A filamentumokat a Pannon Egyetemen, Vonderviszt Ferenc professzor vezetésével működő biofizikai kutatócsoport állította elő.) Bár a kristályok térbelileg

rendezetlenül nukleálódtak, a filamentumok mind a méretet, mind a morfológiát befolyásolták: két kristálypopuláció képződött, a méreteloszlásban két maximummal, és mind oktaéderes, mind lekerekített kristályok képződtek. A jövőben olyan módosított bakteriális filamentumokkal fogunk kísérletezni, amelyek a vasat specifikus helyeken kötik meg, ezáltal a magnetit kristályok nukleációs helyei tevezhetők lesznek.



7. ábra. Változatos morfológiájú, szintetikus magnetit nanokristályok. (a) Szabálytalan; (b) kerekded; (c, d) oktaéderes; (e) megnyúlt, léces kristályok. (f) Heterogén kontrasztú aggregátumok. (g) Korong alakú aggregátumok.



8. ábra. Szulfát zöld rozsda közttermékből képződött magnetit kristályok, amelyek őrzik az elődfázis hexagonális morfológiáját.

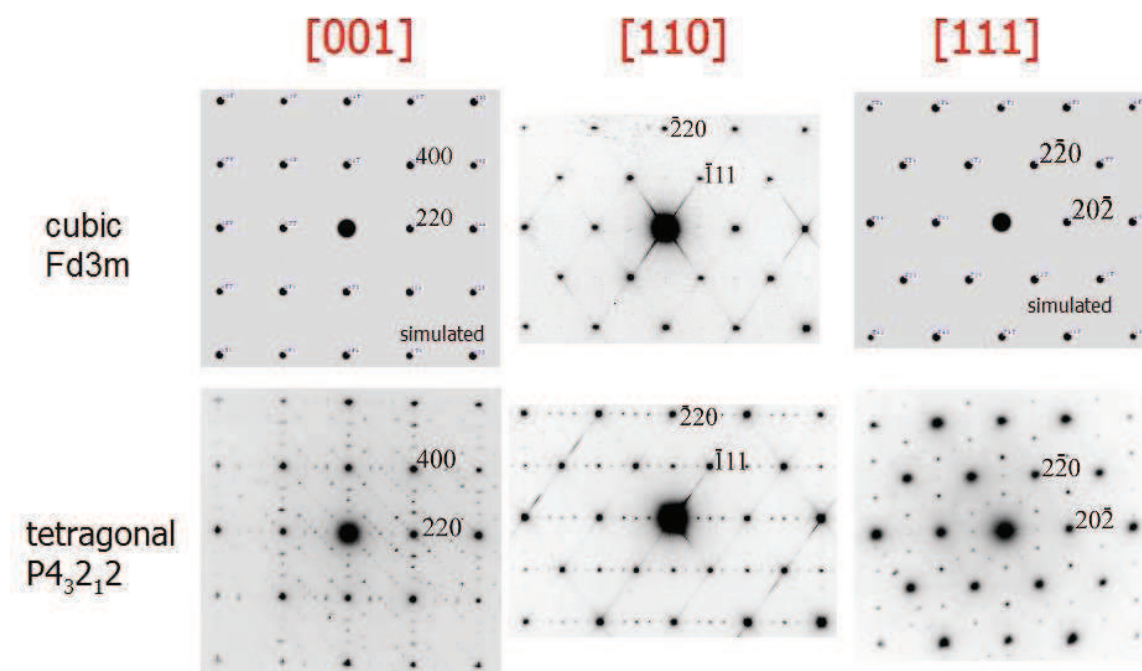
Szokatlan morfológiájú magnetit nanokristályokat állítottunk elő tetraetilénglikol (TEG) és etilénglikol (EG) adalékanyagok hozzáadásával. A TEG és víz 1:1 arányú elegyében szintetizált magnetit kristályok hosszúkásak, az [110] irányban megnyúltak (7.e ábra). A hosszúkás kristályok hatszöges mintákba rendeződnek. Ez annak köszönhető, hogy a magnetit képződését megelőzi egy köztitermék, a „szulfát zöld rozsda” kialakulása. A hexagonális zöld rozsda részecskék kezdeti gyors kialakulása után a magnetit kristályok növekedni kezdenek, a zöld rozsda korrodálódik. Ez arra utal, hogy a folyamat egy oldódási/újrakicsapódási mechanizmus. Semleges és savas pH-n a köztitermék stabil fázis. A zöld rozsda kialakulása után a közeg pH-ja 4-re csökkent, ami stabilizálta a köztiterméket, majd lúgfelesleg adagolása után, a pH növekedésével alakultak ki a magnetit kristályok, melyeknek egymáshoz képest orientált elrendeződése a köztitermékéből való átalakulás következménye (8. ábra).

A TEG és H₂O 3:1 arányú elegyében szintetizált magnetit heterogén kontrasztú, nagy, kerek részecskéket alkot, melyek kisebb kristályokból állnak, azaz polikristályok (7.f ábra). A magnetit kristályok növekedését itt is megelőzte a köztitermék kialakulása, mely lúgfelesleg hozzáadása nélkül fél óra kevertetés után magnetitté alakult. Az EG és víz 1:1 arányú elegyében szintetizált termék szintén kisebb kristályokból álló, nagy, de már tömör szerkezetű polikristályos magnetit (7.g ábra), mely a kiindulási anyagok összeöntése után a köztitermékéből lúgfelesleg adagolása nélkül közvetlenül kialakult. Az egyes részecskéket alkotó nanokristályok nem véletlenszerűen, hanem orientáltan kapcsolódnak egymáshoz, ezért a többszáz nm-es átmérőjű, polikristályos részecskék egykristályra jellemző diffrakciós képet mutatnak.

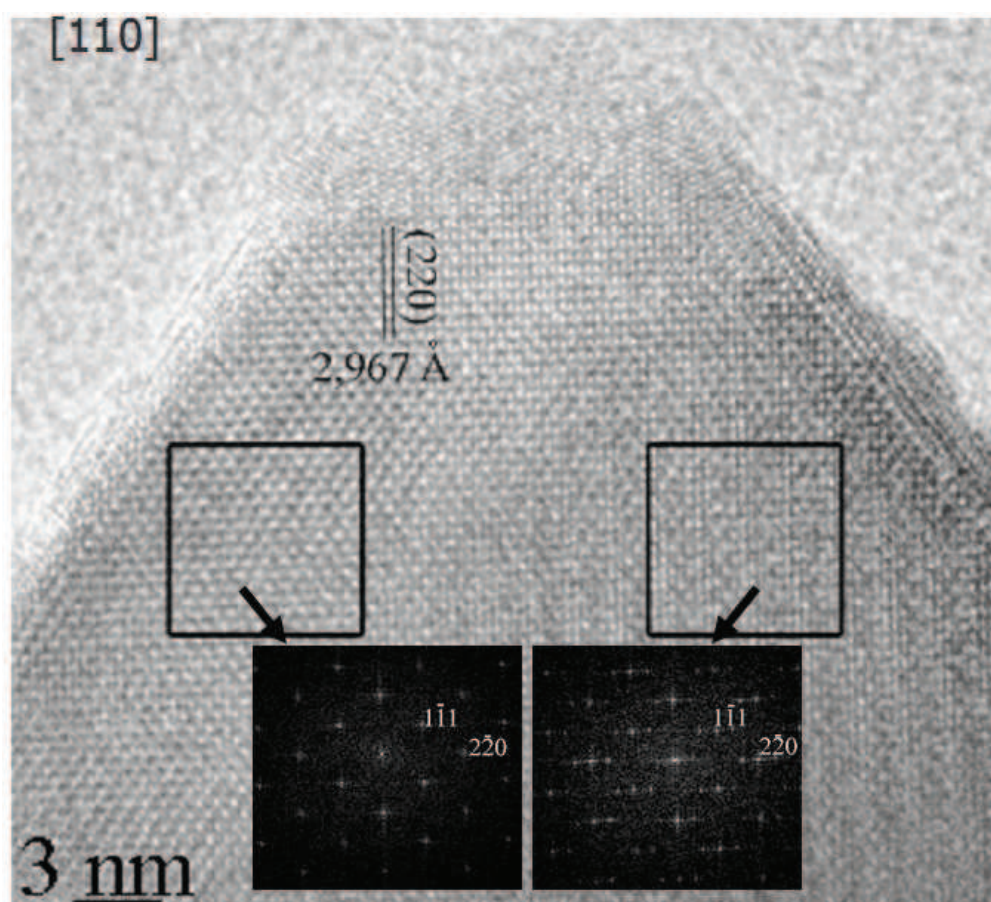
A vizes oldatokban a primer oxid nanorészecskék orientált aggregációja ismert folyamat, melyben a felületi hidroxilcsoportok játszanak fontos szerepet. A vizes oldatokban lejátszódó gyors nukleációhoz és aggregációhoz viszonyítva a nemvizes oldatokban a kristályok aggregációja lassabb a kevesebb felületi hidroxilcsoport és nagyobb viszkozitás miatt, így a részecskék a legkisebb felületi energiájú formát megtalálva tudnak elrendeződni és tökéletesen orientált alakzatot alakítanak ki. Végeredményben az egyedi magnetit kristályok olyan tökéletesen rendeződnek, hogy egykristályra jellemző diffrakciós mintázatot adnak. A különleges kristálytani orientációt és/vagy orientált aggregációt mutató részecskék mágneses tulajdonságai nem triviálisak, ezért a jövőben ezek részletes EH vizsgálatát tervezzük.

2.4.3 A maghemit szerkezete

A magnetit szintézis során több esetben maghemit is képződött. A maghemit a magnetithez hasonlóan spinell szerkezetű, azonban csak teljesen oxidált állapotú vasat tartalmaz, tehát képlete Fe₂O₃. A magnetit szerkezetéhez képest üres vaspozíciók (vakanciák) vannak szerkezetében, melyek valamelyik oktaéderes helyen fordulhatnak elő. A korábbi szerkezetvizsgálatok legalább négyféle maghemit szerkezetet azonosítottak, melyek között van rendezetlen vakancia-eloszlású (Fd3m tércsoportú) és többféle vakancia-rendezett változat (köbös és tetragonális szimmetriával). A mintáinkban képződött maghemit szerkezetét HRTEM és SAED módszerrel vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy egy-egy mintán belül is több különböző szerkezeti variáns található, egyes kristályokban a vakanciák rendeződnek, másokban nem (9. ábra). Sőt, még egy kristályon belül is doménes szerkezetű az anyag, előfordul, hogy a kristály egyik része tetragonális, másik köbös szimmetriát mutat (10. ábra). Az ilyen heterogén részecskék mágneses tulajdonságai nem ismertek, vizsgálatuk szintén a jövő feladata. További terveink között szerepel az egyedi maghemit kristályok szerkezetének meghatározása elektronkrisztallográfia alkalmazásával.



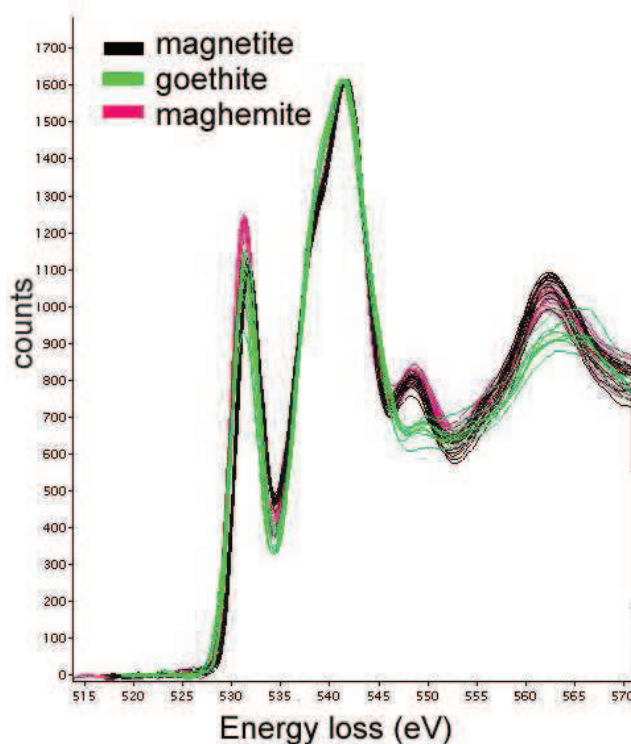
9. ábra. Maghemit kristályokról készült elektrondiffrakciós felvételek három különböző vetületben. A felső sor köbös, az alsó tetragonális szimmetriájú, vakancia-rendeztet változatról készült. A tetragonális változatról készült felvételeken jól láthatók a szupercella reflexiók.



10. ábra. Doménes szerkezetű maghemit kristály, a bekeretezett részekről készült Fourier transzformokkal. A jobb oldali területen látszik a superperiodicitás, utalva a vakancia-rendeztet, tetragonális változatra, míg a bal oldalon a szerkezet köbös.

2.4.4 Vas-oxidok azonosítása elektron-energiavesztési spektrometriával

A nanokristályos vas-oxidok és -oxihidroxidok azonosítása nem könnyű feladat, ha egy mintában többféle fázis is előfordul. Ezért vizsgáltuk, hogy elektron-energiavesztési spektroszkópia (EELS) alkalmazásával mely ásványok különböztethetők meg a nanométeres tartományban. Azt is tanulmányoztuk, hogy a rutin vizsgálatokhoz inkább hozzáférhető, de rosszabb energiefelbontással dolgozó melegkatódos TEM használható-e a vas-oxidok EELS vizsgálatára, vagy csak a hidegkatódos, jóval drágább műszert érdemes erre a célra alkalmazni. Így kétféle elektronmikroszkóppal vettünk fel spektrumokat szintetikus magnetit (Fe_3O_4), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goethit (FeOOH), lepidokrokit (FeOOH) és hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) kristályokról. Megállapítottuk, hogy a magnetit, a maghemit és a hematit azonosítható EELS spektrumuk mennyiségi értékelésével. A goethit és lepidokrokit mért Fe/O aránya nagyobb, mint a sztöchiometrikus érték, ez az elektronsugaras vizsgálatok során történő vízvesztés eredménye. A goethit és a hematit az O K-él finomszerkezete alapján is elkülöníthető a többi vas-ásványtól (11. ábra). Alapvetően a melegkatódos elektronmikroszkóp is alkalmas a kvantitatív EELS vizsgálatokra, bár a rosszabb felbontás a csúcsok finomszerkezetének vizsgálatát nehezíti.



11. ábra. Az oxigén K-éle a magnetit, goethit és maghemit kristályokról készült elektron-energiavesztési spektrumokban. A goethit elkülöníthető a másik két ásványtól a csúcs finomszerkezete alapján.

2.4.5 A szintetikus vas-oxid nanokristályok potenciális alkalmazásai

A ferrimágneses nanokristályoknak számos alkalmazási területe ismert az anyag- és orvostudományban. Ezen alkalmazásoknál fontos a részecskék méretének és alakjának pontos szabályozása. A 2.4.1 és 2.4.2 pontban részletezett módszerekkel a magnetit szintézis olyan módosított és új eljárásait dolgoztuk ki, melyekkel a kristályok átlagos szemcseméretét ~10 és ~280 nm közötti tartományban szabályoztuk. Szabálytalan, kerek, szabályos és megnyúlt oktaéderez, polikristályos mikrokorong és üreges mikrogömb morfológiájú kristályokat állítottunk elő. Méretüknél fogva a 10 nm-es magnetit kristályok jól használhatók ferrofluidumok alapanyagaként. A 10 és 100 nm közötti kristályok megfelelő stabilizálás és felületaktív anyagokkal való kezelést követően a mágneses hipertermiás kezelésekhez

szolgálhatnak alapanyagként. Az üreges mikrogömbök esetleg orvostudományi területen alkalmazhatók hatóanyagok hordozójaként. Ehhez természetesen a módszer továbbfejlesztésére, valamint alapos elővizsgálatokra van szükség. Jelenleg bírálat alatt van egy EU FP7-es pályázatunk, melynek célja tervezett méretű és morfológiájú magnetit kristályok előállítása biomimetikus úton, kimondottan orvosi alkalmazások (MRI vizsgálatok) céljára.

2.5 Egyéb kutatási témák

2.5.1 Magnetit az emberi agyban

Közreműködünk egy olyan kutatási témában, amelynek célja az Alzheimer-kórban szenvedők agyában képződő plakkok fémtartalmának vizsgálata volt. A betegség következményeként az agyban néhány mikrométer átmérőjű fehérjecsomók képződnek, ezek az „amiloid plakkok”. A plakkok nagy fémtartalma már korábban ismert volt, és az is, hogy a fém egy része ferrihidrit formájában van jelen. A kutatás vezetője Jon Dobson (University of Keele) volt, a mi feladatunk a hagyományos TEM vizsgálatok elvégzése, a fém-oxidok ásványtani fázisának meghatározása volt. Az amiloid plakkokban elsősorban magnetit részecskéket találtunk, amelyeknek mérete nagyjából egyezett a ferritin fehérje által körülvevett ferrihidrit méretével. Feltehetően a betegség során a ferrihidrit magnetitté alakul. A magnetit részecskék méretük szerint a szuperparamágneses tartományba tartoznak, és elektronholográfiás méréseink megerősítették, hogy a nanorészecskéknek nincs állandó mágneses momentuma. Eredményeinket a *Journal of Alzheimer's Disease* közölte 2008-ban.

2.5.2 Szintetikus vas-oxid kristályok orvostudományi alkalmazása

Részt vettünk egy alkalmazott orvostudományi kutatásban. Az MRI vizsgálatokhoz kontrasztnövelő anyagként a szuperparamágneses mérettartományba tartozó (30 nm-nél kisebb) vas-oxid kristályok használhatók. Ezek élettani hatását vizsgálta egy cambridge-i kutatócsoport. Feladatunk a nanokristályok ásványtani fázisának meghatározása, a sejtekbe került kristályok esetleges szerkezeti, összetéti változásainak felderítése volt. Megállapítottuk, hogy a kristályok fázisa magnetit, ami a sejtekben sem változik. Az eredményeket a *Biomaterials* című folyóiratban közzétettük 2007-ben, azóta erre a cikkre 22 független hivatkozást kaptunk.

2.5.3 Magnetit nanokristályok és agyagásványok aggregátumainak mágnessége

Egy több kutatócsoportból álló konzorcium munkájában közreműködve szintetikus magnetit és montmorillonit nanokristályok elegyét vizsgáltuk. A munka hátterében az a feltevés áll, hogy egyrészt az agyag felületén rögzítve a magnetit kristályokat valamilyen érdekes mágneses tulajdonságú anyagot kaphatunk, másrészt az agyag/magnetit kompozit segítségével modellezhető a mágneses anyagok lerakódása egy üledékgyűjtőben. A kutatás konkrét célja az agyaglemezekre tapadt magnetit aggregátumok kristálytani és mágneses tulajdonságainak jellemzése volt. EH mérésekkel megállapítottuk, hogy a nanométeres magnetit részecskék aggregátumai is szuperparamágneses viselkedést mutatnak. Az eredményeket az *American Mineralogist* folyóiratban közzétettük.

3. Publikációk és hivatkozások

A pályázat témájában (2005 óta) eddig **16 publikáció** jelent meg (konferencia kiadványok nélkül, csak a bírálókon átment folyóiratcikket és könyvfejezeteket számítva), amelyek **összesített impakt faktora 30,605**. Ezekre a tanulmányokra eddig összesen **59 cikkben hivatkoztak** (csak a független hivatkozásokat számolva). Az alábbiakban felsoroljuk a publikációkat a független hivatkozásokkal együtt:

1. Simpson, E.T., Kasama, T., Pósfai, M., Buseck, P.R., Harrison, R.J. and Dunin-Borkowski, R.E.: *Magnetic induction mapping of magnetite chains in magnetotactic bacteria at room temperature and close to the Verwey transition using electron holography*, Journal of Physics: Conference Series, 17, 108-121, 2005

Li, J., Pan, Y., Chen, G., Liu, Q., Tian, L., Lin, W.
Magnetite magnetosome and fragmental chain formation of Magnetospirillum magneticum AMB-1: Transmission electron microscopy and magnetic observations (2009) Geophysical Journal International, 177 (1), pp. 33-42.

Faivre, D., Schüller, D.
Magnetotactic bacteria and magnetosomes (2008) Chemical Reviews, 108 (11), pp. 4875-4898.

Fischer, H., Mastrogiacomio, G., Löffler, J.F., Warthmann, R.J., Weidler, P.G., Gehring, A.U.
Ferromagnetic resonance and magnetic characteristics of intact magnetosome chains in Magnetospirillum gryphiswaldense (2008) Earth and Planetary Science Letters, 270 (3-4), pp. 200-208.

Prozorov, R., Prozorov, T., Mallapragada, S.K., Narasimhan, B., Williams, T.J., Bazylinski, D.A.
Magnetic irreversibility and the Verwey transition in nanocrystalline bacterial magnetite (2007) Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 76 (5), art. no. 054406.

2. Kasama, T., Pósfai, M., Chong, R.K.K., Finlayson, A.P.R., Buseck, P.R., Frankel, R.B., and Dunin-Borkowski, R.E.: *Magnetic properties, microstructure, composition, and morphology of greigite nanocrystals in magnetotactic bacteria from electron holography and tomography*, American Mineralogist, 91, 1216-1229., 2006

Babinszki, E., Mártonné Szalay, E.
The identification of greigite in the sediments of Lake Pannon using magnetic methods and with respect to it being carrier of the palaeomagnetic signal [A greigitnek, mint a paleomágneses jel hordozójának azonosítása mágneses módszerekkel, a Pannon-tó üledékeiben] (2009) Foldtani Kozlony, 139 (2), pp. 167-178.

Carvallo, C., Hickey, S., Faivre, D., Menguy, N.
Formation of magnetite in Magnetospirillum gryphiswaldense studied with FORC diagrams (2009) Earth, Planets and Space, 61 (1), pp. 143-150.

Neues, F., Eppler, M.
X-ray microcomputer tomography for the study of biomineralized endo- and exoskeletons of animals (2008) Chemical Reviews, 108 (11), pp. 4734-4741.

Faivre, D., Schüller, D.
Magnetotactic bacteria and magnetosomes (2008) Chemical Reviews, 108 (11), pp. 4875-4898.

Chang, L., Roberts, A.P., Tang, Y., Rainford, B.D., Muxworthy, A.R., Chen, Q.

Fundamental magnetic parameters from pure synthetic greigite (Fe₃S₄)
(2008) Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 113 (6), art. no. B06104.

Hunger, S., Benning, L.G.
Greigite: A true intermediate on the polysulfide pathway to pyrite
(2007) Geochemical Transactions, 8, art. no. 1.

3. Kasama, T., Pósfai, M., Chong, R.K.K., Finlayson, A.P.R., Dunin-Borkowski, R.E. and Frankel, R.B.:
Magnetic microstructure of iron sulfide crystals in magnetotactic bacteria from off-axis electron holography,
Physica B, 384, 249-252., 2006

Wang, X., Liang, L.
Effects of static magnetic field on magnetosome formation and expression of mamA, mms13, mms6 and magain Magnetospirillum magneticum AMB-1
(2009) Bioelectromagnetics, 30 (4), pp. 313-321.

Faivre, D., Schüller, D.
Magnetotactic bacteria and magnetosomes
(2008) Chemical Reviews, 108 (11), pp. 4875-4898.

Chang, L., Roberts, A.P., Tang, Y., Rainford, B.D., Muxworthy, A.R., Chen, Q.
Fundamental magnetic parameters from pure synthetic greigite (Fe₃S₄)
(2008) Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 113 (6), art. no. B06104.

Quintana, C.
Contribution of analytical microscopies to human neurodegenerative diseases research (PSP and AD)
(2007) Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 7 (9), pp. 961-975.

4. Pósfai, M. and Dunin-Borkowski, R.E.: ***Sulfides in biosystems***, In Sulfide Mineralogy and Geochemistry.
Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 61, 679-714, 2006

Barnard, A.S., Russo, S.P.
Modelling nanoscale FeS₂ formation in sulfur rich conditions
(2009) Journal of Materials Chemistry, 19 (21), pp. 3389-3394.

Burton, E.D., Bush, R.T., Sullivan, L.A., Hocking, R.K., Mitchell, D.R.G., Johnston, S.G., Fitzpatrick, R.W., Raven, M., McClure, S., Jang, L.Y.
Iron-monosulfide oxidation in natural sediments: Resolving microbially mediated S transformations using XANES, electron microscopy, and selective extractions
(2009) Environmental Science and Technology, 43 (9), pp. 3128-3134.

Barnard, A.S., Russo, S.P.
Morphological stability of pyrite FeS₂ nanocrystals in water
(2009) Journal of Physical Chemistry C, 113 (14), pp. 5376-5380.

Aelion, C.M., Warttinger, U.
Low sulfide concentrations affect nitrate transformations in freshwater and saline coastal retention pond sediments
(2009) Soil Biology and Biochemistry, 41 (4), pp. 735-741.

Faivre, D., Schüller, D.
Magnetotactic bacteria and magnetosomes
(2008) Chemical Reviews, 108 (11), pp. 4875-4898.

Martins, J.L., Silveira, T.S., Abreu, F., Silva, K.T., Da Silva-Neto, I.D., Lins, U.
Grazing protozoa and magnetosome dissolution in magnetotactic bacteria
(2007) Environmental Microbiology, 9 (11), pp. 2775-2781.

Larrasoana, J.C., Roberts, A.P., Musgrave, R.J., Gràcia, E., Piñero, E., Vega, M., Martínez-Ruiz, F.

Diagenetic formation of greigite and pyrrhotite in gas hydrate marine sedimentary systems
(2007) Earth and Planetary Science Letters, 261 (3-4), pp. 350-366.

Cavalazzi, B., Barbieri, R., Ori, G.G.
Chemosynthetic microbialites in the Devonian carbonate mounds of Hamar Laghdad (Anti-Atlas, Morocco)
(2007) Sedimentary Geology, 200 (1-2), pp. 73-88.

Pearce, C.I., Pattrick, R.A.D., Vaughan, D.J.
Electrical and magnetic properties of sulfides
(2006) Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 61, pp. 127-180.

5. Pósfai, M., Moskowitz, B.M., Arató, B., Schüller, D., Flies, C., Bazylinski, D.A., and Frankel, R.B.: **Properties of intracellular magnetite crystals produced by *Desulfovibrio magneticus* strain RS-1**, Earth and Planetary Science Letters, 249, 444-455, 2006

Lin, W., Pan, Y.
Uncultivated magnetotactic cocci from Yuandadu Park in Beijing, China
(2009) Applied and Environmental Microbiology, 75 (12), pp. 4046-4052.

Li, J., Pan, Y., Chen, G., Liu, Q., Tian, L., Lin, W.
Magnetite magnetosome and fragmental chain formation of Magnetospirillum magneticum AMB-1: Transmission electron microscopy and magnetic observations
(2009) Geophysical Journal International, 177 (1), pp. 33-42.

Arakaki, A., Nakazawa, H., Nemoto, M., Mori, T., Matsunaga, T.
Formation of magnetite by bacteria and its application
(2008) Journal of the Royal Society Interface, 5 (26), pp. 977-999.

Vergés, M.A., Costo, R., Roca, A.G., Marco, J.F., Goya, G.F., Serna, C.J., Morales, M.P.
Uniform and water stable magnetite nanoparticles with diameters around the monodomain-multidomain limit
(2008) Journal of Physics D: Applied Physics, 41 (13), art. no. 134003.

Fischer, H., Mastrogiacomo, G., Löffler, J.F., Warthmann, R.J., Weidler, P.G., Gehring, A.U.
Ferromagnetic resonance and magnetic characteristics of intact magnetosome chains in Magnetospirillum gryphiswaldense
(2008) Earth and Planetary Science Letters, 270 (3-4), pp. 200-208.

Kopp, R.E., Kirschvink, J.L.
The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria
(2008) Earth-Science Reviews, 86 (1-4), pp. 42-61.

6. Frankel, R.B., Dunin-Borkowski, R.E., Pósfai, M. and Bazylinski, D.A.: **Magnetic microstructure of magnetotactic bacteria**, Handbook of Biomineralization, E. Baeuerlein ed., Wiley-VCH, Weinheim, 127-144., 2007

7. Kósa I., Pósfai M.: **Mágneses baktériumok a Balatonban**, Hidrológiai Közlöny, 87(6), 90-92., 2007

8. Müller, K., Skepper, J.N., Pósfai, M., Trivedi, R., Howarth, S., Corot, C., Lancelot, E., Thompson, P.W., Brown, A. and Gillard, J.H.: **Effect of ultrasmall superparamagnetic iron oxide nanoparticles (Ferumoxtran-10) on human monocyte-macrophages in vitro**, Biomaterials, 28, 1629-1642., 2007

Ge, Y., Zhang, Y., Xia, J., Ma, M., He, S., Nie, F., Gu, N.
Effect of surface charge and agglomerate degree of magnetic iron oxide nanoparticles on KB cellular uptake in vitro
(2009) Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 73 (2), pp. 294-301.

Luciani, N., Gazeau, F., Wilhelm, C.

- Reactivity of the monocyte/macrophage system to superparamagnetic anionic nanoparticles
(2009) Journal of Materials Chemistry, 19 (35), pp. 6373-6380.
- Dwivedi, P.D., Misra, A., Shanker, R., Das, M.
Are nanomaterials a threat to the immune system?
(2009) Nanotoxicology, 3 (1), pp. 19-26.
- Jones, C.F., Grainger, D.W.
In vitro assessments of nanomaterial toxicity
(2009) Advanced Drug Delivery Reviews, 61 (6), pp. 438-456.
- Arbab, A.S., Janic, B., Haller, J., Pawelczyk, E., Liu, W., Frank, J.A.
In vivo cellular imaging for translational medical research
(2009) Current Medical Imaging Reviews, 5 (1), pp. 19-38.
- Fleischer, T., Krug, H.F.
Risk potential of nanomaterials [Risikopotenzial von nanomaterialien]
(2009) Tagliche Praxis, 50 (2), pp. 453-462.
- Villanueva, A., Căete, M., Roca, A.G., Calero, M., Veintemillas-Verdaguer, S., Serna, C.J., Del Puerto Morales, M., Miranda, R.
The influence of surface functionalization on the enhanced internalization of magnetic nanoparticles in cancer cells
(2009) Nanotechnology, 20 (11), art. no. 115103.
- Shen, S., Liu, Y., Huang, P., Wang, J.
In vitro cellular uptake and effects of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles on HeLa cells
(2009) Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 9 (5), pp. 2866-2871.
- Lee, C.-M., Jeong, H.-J., Kim, S.-L., Kim, E.-M., Kim, D.W., Lim, S.T., Jang, K.Y., Jeong, Y.Y., Nah, J.-W., Sohn, M.-H.
SPION-loaded chitosan-linoleic acid nanoparticles to target hepatocytes
(2009) International Journal of Pharmaceutics, 371 (1-2), pp. 163-169.
- Mu, Q., Li, Z., Li, X., Mishra, S.R., Zhang, B., Si, Z., Yang, L., Jiang, W., Yan, B.
Characterization of Protein Clusters of Diverse Magnetic Nanoparticles and Their Dynamic Interactions with Human Cells
(2009) Journal of Physical Chemistry C, 113 (14), pp. 5390-5395.
- Li, H., Zhou, Q., Wu, Y., Fu, J., Wang, T., Jiang, G.
Effects of waterborne nano-iron on medaka (*Oryzias latipes*): Antioxidant enzymatic activity, lipid peroxidation and histopathology
(2009) Ecotoxicology and Environmental Safety, 72 (3), pp. 684-692.
- Babič, M., Horák, D., Jendelová, P., Glogarová, K., Herynek, V., Trchová, M., Likavčanová, K., Lesný, P., Pollert, E., Hájek, M., Syková, E.
Poly(N,N-dimethylacrylamide)-coated maghemite nanoparticles for stem cell labeling
(2009) Bioconjugate Chemistry, 20 (2), pp. 283-294.
- Xia, J.G., Zhang, S., Zhang, Y., Ma, M., Gu, N.
Maghemite nanoparticles and their protamine derivatives: Cellular internalization and effects on cell-cycle progress
(2009) Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 9 (2), pp. 1025-1028.
- Uchida, M., Willits, D.A., Muller, K., Willis, A.F., Jackiw, L., Jutila, M., Young, M.J., Porter, A.E., Douglas, T.
Intracellular distribution of macrophage targeting ferritin-iron oxide nanocomposite
(2009) Advanced Materials, 21 (4), pp. 458-462.
- Zhang, S., Chen, X., Gu, C., Zhang, Y., Xu, J., Bian, Z., Yang, D., Gu, N.
The effect of iron oxide magnetic nanoparticles on smooth muscle cells
(2009) Nanoscale Research Letters, 4 (1), pp. 70-77.

Xia, J., Zhang, S., Zhang, Y., Ming, M., Xu, K., Tang, M., Gu, N.
The relationship between internalization of magnetic nanoparticles and changes of cellular optical scatter signal
(2008) *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8 (12), pp. 6310-6315.

Munnier, E., Cohen-Jonathan, S., Linassier, C., Douziech-Eyrolles, L., Marchais, H., Soucé, M., Hervé, K., Dubois, P., Chourpa, I.
Novel method of doxorubicin-SPION reversible association for magnetic drug targeting
(2008) *International Journal of Pharmaceutics*, 363 (1-2), pp. 170-176.

Wu, P.-C., Su, C.-H., Cheng, F.-Y., Weng, J.-C., Chen, J.-H., Tsai, T.-L., Yeh, C.-S., Su, W.-C., Hwu, J.R., Tzeng, Y., Shieh, D.-B.
Modularly assembled magnetite nanoparticles enhance in vivo targeting for magnetic resonance cancer imaging
(2008) *Bioconjugate Chemistry*, 19 (10), pp. 1972-1979.

Klaine, S.J., Alvarez, P.J.J., Batley, G.E., Fernandes, T.F., Handy, R.D., Lyon, D.Y., Mahendra, S., McLaughlin, M.J., Lead, J.R.
Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects
(2008) *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27 (9), pp. 1825-1851.

Lewinski, N., Colvin, V., Drezek, R.
Cytotoxicity of nanoparticles
(2008) *Small*, 4 (1), pp. 26-49

Singh, S., Nalwa, H.S.
Nanotechnology and health safety - Toxicity and risk assessments of nanostructured materials on human health
(2007) *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7 (9), pp. 3048-3070.

Dobrovolskaia, M.A., McNeil, S.E.
Immunological properties of engineered nanomaterials
(2007) *Nature Nanotechnology*, 2 (8), pp. 469-478.

9. Pósfai, M., Kasama, T. and Dunin-Borkowski, R.E.: *Characterization of bacterial magnetic nano-structures using high-resolution transmission electron microscopy and off-axis electron holography*, In *Magnetoreception and magnetosomes in bacteria*, D. Schüller ed., Microbiology Monographs 3, Springer, Berlin Heidelberg New York, 197-225, 2007

Bazylinski DA, Schubbe S
Controlled biomineralization by and applications of magnetotactic bacteria
ADVANCES IN APPLIED MICROBIOLOGY, VOL 62 62: 21-62 (2007)

Moskowitz BM, Bazylinski DA, Egli R, Frankel RB, Edwards KJ
Magnetic properties of marine magnetotactic bacteria in a seasonally stratified coastal pond (salt pond, ma, usa)
GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL 174: (1) 75-92 (2008)

Faivre D, Schuler D
Magnetotactic bacteria and magnetosomes
CHEMICAL REVIEWS 108: (11) 4875-4898 (2008)

Alphandery E, Ding Y, Ngo AT, Wang ZL, Wu LF, Pileni MP
Assemblies of aligned magnetotactic bacteria and extracted magnetosomes: what is the main factor responsible for the magnetic anisotropy?
ACS NANO 3: (6) 1539-1547 (2009)

Li JH, Pan YX, Chen GJ, Liu QS, Tian LX, Lin W
Magnetite magnetosome and fragmental chain formation of magnetospirillum magneticum amb-1: transmission electron microscopy and magnetic observations
GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL 177: (1) 33-42 (2009)

10. Collingwood, J.F., Chong, R.K.K., Kasama, T., Cervera Gontard, L., Dunin-Borkowski, R.E., Perry, G., Pósfai, M., Siedlak, S., Simpson, E.T., Smith, M.A. and Dobson, J.: *Three-dimensional tomographic imaging*

and characterization of iron compounds within Alzheimer's plaque core material, Journal of Alzheimer's Disease, 14, 235-245, 2008

Meadowcroft, M.D., Connor, J.R., Smith, M.B., Yang, Q.X.
MRI and Histological Analysis of Beta-Amyloid Plaques in Both Human
Alzheimer's Disease and APP/PS1 Transgenic Mice
(2009) Journal of Magnetic Resonance Imaging, 29 (5), pp. 997-1007.

Duyckaerts, C., Delatour, B., Potier, M.-C.
Classification and basic pathology of Alzheimer disease
(2009) Acta Neuropathologica, 118 (1), pp. 5-36.

11. Faivre, D., Menguy, N., Pósfai, M. and Schüller, D.: *Effects of environmental parameters on the physical properties of fast-growing magnetosomes*, American Mineralogist, 93, 463-469., 2008

Xie, J., Chen, K., Chen, X.
Production, modification and bio-applications of magnetic nanoparticles
gestated by magnetotactic bacteria
(2009) Nano Research, 2 (4), pp. 261-278.

12. Galindo-Gonzalez, C., Feinberg, J.M., Kasama, T., Cervera Gontard, L., Pósfai, M., Kósa, I., Duran, J.D.G., Gil, J.E., Harrison, R.J., and Dunin-Borkowski, R.E.: *Magnetic and microscopic characterization of magnetite nanoparticles adhered to clay surfaces*, American Mineralogist, 94, 1120-1129., 2009

13. Nyíró-Kósa, I., Csákberényi Nagy, D., Pósfai, M.: *Size and shape control of precipitated magnetite nanoparticles*, European Journal of Mineralogy, 21, 293-302., 2009

14. Pósfai M.: *Mágneses baktériumok*, Fizikai Szemle, 59, 174-177., 2009

15. Pósfai, M. and Dunin-Borkowski, R.E.: *Magnetic nanocrystals in organisms*, Elements, 5, 235-240., 2009

16. Pósfai, M.: *Magnetotactic bacteria*, In: Encyclopedia of Geobiology, in press, 2010.

4. A kutatáshoz kapcsolódó egyéb tevékenység, a kutatás visszhangja, egyéb eredmények

4.1 Nemzetközi konferencia szervezése

A mágneses baktériumokkal kapcsolatos kutatás jellemzően interdiszciplináris, ezért egymástól távoli tudományágakban dolgozó fizikusok, biológusok, mineralógusok és geofizikusok érdekeltek benne. Mivel a különböző területeken dolgozó kollégák a érdeklődésüknek leginkább megfelelő szakterületi konferenciákat látogatják, egymással ritkán találkoznak. Emiatt felmerült az igény egy kizárólag a mágneses baktériumokkal foglalkozó konferencia iránt, amelynek rendezését Dirk Schüller professzorral együtt vállaltam. A rendezvényt „Workshop on Magnetotactic Bacteria” címmel Balatonfüreden tartottuk 2008. június 9-11-ig. 11 országból mintegy 70 résztvevő érkezett. A konferencia sikere nyomán a résztvevők elhatározták, hogy ezentúl két évente rendeznek hasonló összejeveteleket. A következő mágneses baktériumos konferencia 2010-ben, Kínában lesz.

A konferencia honlapja (a programmal és az előadások kivonataival együtt) az alábbi címen érhető el: <http://mkweb.uni-pannon.hu/ft/mtb/generalinformation.html>

4.2 Előadások

Az írásban megjelent közleményeken kívül a pályázat témájában kapott eredményeket az alábbi előadásokon ismertettem (ezek többsége meghívott előadás):

2006:

- 3rd Mineral Sciences in the Carpathians Conference, Miskolc, március 9-10.
- MTA Földtudományok Osztályának közgyűlési osztályülése, május 10.
- International Workshop on Low-Temperature Geochemistry for Understanding Sustainable Metabolic Systems. Sapporo, július 20-21. (meghívott előadás)
- 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, Kobe, július 23-28. (meghívott előadás)
- 23rd European Crystallography Meeting, Leuven, augusztus 6-11. (meghívott előadás)
- Conference on Nanobiophysics, Szeged, szeptember 3-7. (meghívott előadás)
- Université Fribourg, december 19. (meghívott szemináriumi előadás)

2007:

- Conference on Magnetic Interactions, Cambridge, január 9. (meghívott előadás)
- ELTE, Anyagfizikai Tanszék, február 27. (meghívott szemináriumi előadás)
- “Tudomány egy órában” előadássorozat, Zenta, március 15. (meghívott előadás)
- MTA Szilárdtestfizikai Kutatóintézet, április 24. (meghívott szemináriumi előadás)
- 8th Multinational Congress on Microscopy, Prága, június 17-21. (meghívott előadás)
- Frontiers in Mineral Sciences, Cambridge, június 26-28. (poszter)
- American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, december 10-14. (poszter)

2008:

- Magyar Mikroszkópos Társaság konferenciája, Balatonalmádi, május 15-17.
- Functional Nanostructures and Particles, Portoroz, május 26-30. (meghívott előadás)
- Workshop on Magnetotactic Bacteria, Balatonfüred, június 9-11. (2 előadás, 2 poszter)
- MTA Földtudományok Osztálya, Budapest, szept. 30. (meghívott előadás)
- Pannon Tudományos Műhelyek sorozat, Veszprém, dec. 3. (meghívott előadás)
- Veszprémi Akadémiai Bizottság Közgyűlése, Veszprém, dec. 6. (meghívott előadás)

2009:

- Magyar Mikroszkópos Konferencia, Siófok, május 21-23.
- Goldschmidt Conference on Geochemistry, Davos, június 21-26.
- Microscopy & Microanalysis Meeting, Richmond, VA, július 26-30. (meghívott előadás)
- 11th Scientific Assembly of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, augusztus 23-30. (meghívott előadás)
- MinPet2009 and 4th Mineral Sciences in the Carpathians Conference, Budapest, szept. 7-11. (1 meghívott előadás, 2 poszter)

4.3 TDK, szakdolgozat és PhD

A pályázat témájából 2 TDK és 3 szakdolgozat készült, az alábbi címekkel:

- Kósa Ilona, környezetkutató: Mágneses baktériumok a Balatonban (TDK és szakdolgozat);
- Csákberényi Nagy Dorottya, vegyész: Magnetit nanokristályok szintézise és vizsgálata (TDK és szakdolgozat);
- Fekete Lajos, kémia szakos tanár: Szabályozott morfológiájú hematit kristályok szintézise és jellemzése (szakdolgozat).

Az Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencián TDK dolgozatával Kósa Ilona 2006-ban különdíjat, Csákberényi Nagy Dorottya 2008-ban első díjat nyert. Csákberényi Nagy Dorottya szakdolgozatáért 2008-ban elnyerte a Magyar Kémikusok Egyesülete Nívódíját.

Kósa Ilona 2006-2009-ig a Pannon Egyetem Környezettudományi Doktori Iskolájában PhD hallgatóként folytatta kutatását, témája „A magnetit nanokristályok biomimetikus szintézise”. 2009-ben megszerezte abszolutóriumát, dolgozata is elkészült, doktori védése várhatóan ez év végéig lezajlik.

4.4 Ismeretterjesztő tevékenység

A szakmai folyóiratokon kívül a tudományos ismeretterjesztő fórumokon is igyekeztünk munkánkat megismertetni:

- részben a tudományos ismeretterjesztés kategóriájába sorolható a Fizikai Szemlében megjelent cikk, amely e jelentés 3. pontja alatt a 14. publikációként szerepel;
- egy hasonló ismeretterjesztő fejezet megjelent a Veszprémi Akadémiai Bizottság által kiadott 2008-as VEAB Évkönyvben, címe Mágneses bioásványok.
- A Egyetem Televízió Veszprém „Tudományos Magazin” című sorozatában 20 perces műsor készült kutatásunkról: <http://etv.vein.hu/download.php?view.317>

A fentiek kívül eredményeinkről a nyomtatott és elektronikus sajtóban az alábbi helyeken jelentek meg hosszabb-rövidebb híradások:

- Élet és Tudomány, 2008/16: 3 oldalas cikk (szerzője Kittel Ágnes) a mágneses baktériumokról és munkánkról;
- National Geographic Magyarország, 2007. április: 2 oldal munkánkról;
- Magyar Szó, Újvidék, 2007. március 15.: riport a mágneses baktériumokról a zentai előadásom kapcsán;
<http://archiv.magyarsozo.com/arhiva/2007/03/15/main.php?l=b6.htm>

- Tudásmédia, 2008. április 11.: A tökéletes iránytű: mágneses baktériumok
http://www.tudasmedia.hu/index.php?option=com_content&task=view&id=217&Itemid=50
- Figyelő, 2008/28: http://www.fn.hu/hetilap/k_f/20080708/magneses_bakteriumok/

5. A kutatáshoz felhasznált egyéb támogatás

Az elektronholográfiás méréseket a Cambridge-i Egyetemen végeztük, ezek költségeit az együttműködő angol kolléga, Dr. Rafal Dunin-Borkowski pályázatai fedezték. A mikrobiológiai munkához és a genetikailag módosított baktériumok előállításához szükséges biológiai műszerparkot és szaktudást a német és francia együttműködők biztosították (Prof. Dirk Schüler és Dr. Damien Faivre), és a kutatás ezen részének költségeit is ők fedezték. Egyes esetekben a kutatással kapcsolatos utazás és mikroszkópos vizsgálat költségeihez Prof. Peter Buseck (Arizona State University) is hozzájárult.

6. Nyilatkozat

Hozzájárulok ahhoz, hogy a K48607 OTKA nyilvántartási számú kutatás eredményei alapján készült zárójelentésemet az OTKA Bizottság nyilvánosságra hozza, illetve a tudományos közösség számára ismert, elérhető archívumban archiválja.

Veszprém, 2009. október 12.

Pósfai Mihály